

プラズマ中における混成波生成

著者	大沼 俊朗
号	312
発行年	1971
URL	http://hdl.handle.net/10097/9048

氏 名 (本 籍) 大 沼 俊 朗 (宮 城 県)

学 位 の 種 類 工 学 博 士

学 位 記 番 号 工 博 第 3 1 2 号

学位授与年月日 昭和 4 6 年 4 月 1 4 日

学位授与の要件 学位規則第 5 条第 1 項該当

研究科専門課程 東北大学大学院工学研究科
(博士課程) 電子工学専攻

学 位 論 文 題 目 プラズマ中における混成波生成

(主 査)

論 文 審 査 委 員 教授 八 田 吉 典 教 授 柴 田 幸 男

教授 小 野 昭 一 助 教 授 佐 藤 徳 芳

論 文 内 容 要 旨

第 I 章 序 論

本論文は、非線形現象の 1 つであるプラズマ中での分布型混成現象を、実験・理論両面から行なった研究である。非線形媒質に周波数 ω_1 と ω_2 の振動を与えると、それらの和、及び、差周波数である $\omega_1 \pm \omega_2$ 成分の量が生ずる。波動の場合、各場所にて生成された $\omega_1 \pm \omega_2$ 成分の波は、各々の場所より波として伝搬しはじめる。3 つの波動の間に共鳴条件 $\mathbf{K}_3 = \mathbf{K}_1 \pm \mathbf{K}_2$, $\omega_3 = \omega_1 \pm \omega_2$ がみたされる場合、各場所より伝搬した ω_3 成分は、位相が合って波の振幅の積み重ねが行なわれる。即ち、 ω_3 成分の振幅は場所的に増大することになる。逆に、共鳴条件が成立たなく、 $\mathbf{K}_3 + \Delta \mathbf{K} = \mathbf{K}_1 + \mathbf{K}_2$ の様に、 $\Delta \mathbf{K}$ なる共鳴しない波数ベクトルが入ると、積み重ね効果が弱くなる。本論文では、プラズマ中のイオン波は、周波数を変化した場合でも位相速度が一定である領域（共鳴条件がみ

たされる)が広いことに着目し、上記の実験を行ない、理論的に考察したものである。

第Ⅱ章 実 験

Ⅱ-1. 実験装置及び実験方法

前方拡散型プラズマを用いる。使用されたガスはアルゴンで、気圧は $3 \times 10^{-3} \sim 4 \times 10^{-2}$ Torr. である。代表的な電子密度は $10^8 \sim 10^9 \text{ cm}^{-3}$, 電子温度は $5 \times 10^4 \text{ K}$ である。イオン波の励起と検出はグリットにて行なわれ, dual-beam oscilloscope, frequency analyzer, lock-in amplifier にて調べられた。

Ⅱ-2. 拡散プラズマ中でのイオン波の伝搬特性

波の励起は、連続サイン波、又は、サイン・バーストを印加することにより行なわれ、周波数は 20 KHz から 500 KHz まで変化させた。励起された波の位相速度は、プラズマ源より離れる方向には、 $3.5 \times 10^5 \text{ cm/sec}$, 逆方向には $2.5 \times 10^5 \text{ cm/sec}$ である。即ち、プラズマは $5 \times 10^4 \text{ cm/sec}$ の速さで流れている。位相速度は、周波数が 20 KHz から 200 KHz 程度まで程々一定になっているが、これ以上の周波数においては遅くなっている。プラズマの流れの速さをなくした位相速度はイオン音波の速度に一致している。波の減衰距離は周波数に関係しない。又、減衰距離はガス圧の増大と共に短くなる傾向にある。

Ⅱ-3. 混成波の伝搬及び減衰距離

周波数の異なる2つのイオン波を1つのグリットにて励起した時、検出用のグリットに ω_1 と ω_2 成分の信号の他に、 $\omega_1 \pm \omega_2$ 成分の信号も検出される。 $\omega_1 \pm \omega_2$ 信号の振幅は、 ω_1 と ω_2 信号の振幅が単調減少するのに反して、場所的に、最初増大してゆき、次に減衰していくことが検出された。 $\omega_1 \pm \omega_2$ 信号の位相速度は、 ω_1 と ω_2 波の振幅変化は、 ω_1 あるいは ω_2 波が単独に存在する時の同じである。 $\omega_1 \pm \omega_2$ 信号のピークの位置は、中性のガス圧を大きくして波の減衰を大きくするにつれ、励起点に近づく傾向にある。 $\omega_1 \pm \omega_2$ の信号は、 ω_1 と ω_2 の励起電圧に比例する。 $\omega_1 \pm \omega_2$ 信号は、周波数を高くしていくとある周波数より小さくなる。

Ⅱ-4. 高調波の伝搬及び減衰特性

単一のイオン波 (ω) の伝搬においても、高調波 (2ω) の信号が検出され、前節の $\omega_1 \pm \omega_2$ と同様に場所的に増大する領域がある。高調波の位相速度は基本波と同じである。高調波のピーク値は基本波の励起電圧の2乗に比例する。

第Ⅲ章 理 論

Ⅲ-1. 物理的内容

混成波の微視的モデルは序論に述べてある。この非線形混成現象は、波と波との相互作用の一つの

極限になっている。

Ⅲ－2. 理論的解析

周波数の異なる2つのイオン波を外部励起した場合のモデルにて、3つのイオン波の伝搬における波と波との非線形相互作用という観点より理論解析を行なう。Oraevskii等の指摘にてイオン波の間でのディケイ不安定現象はその分散式の形より不可能とされてきたが、位相速度が一定であるイオン音波領域では共鳴条件が成立つ。この領域のイオン波を考え、考察する3つのイオン波において、 $K_2 = K_1 + K_3$ 、 $\omega_2 = \omega_1 + \omega_3$ (ω_1 ; 大振幅波) が成立つものとする。波長がデバイ長より十分長い時、イオン波の基本式として、

$$\partial n_i / \partial t + \partial (n_i v_i) / \partial x = 0 \quad (1)$$

$$(\partial / \partial t + v_i \partial / \partial x) v_i + C_p^2 / n_i \cdot (\partial n_i / \partial x) + \nu_{in} v_i = 0, \quad (2)$$

を用いる。これより、 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 成分の結合方程式を作り、 $|2K_{2,3} \partial n_{2,3} / \partial x| \gg |\partial^2 n_{2,3} / \partial x^2|$ を用いると、

$$(1/\delta + \partial / \partial x) n_3 = \omega_3 n_1 n_2 / C_p N_0, \quad (3)$$

$$(1/\delta + \partial / \partial x) n_2 = -\omega_2 n_1 n_3 / C_p N_0 \quad (4)$$

が得られる。以上において、 v と n は速度と密度、 C_p はイオン音速、 ν_{in} はイオン・中性分子間衝突周波数を示し、 $\delta = 2 C_p / \nu_{in}$ である。(3)(4)式の右辺が非線形項よりの帰与である。

Ⅲ－2－1. 衝突項を考慮しない場合

Ⅲ－2－2の衝突がある場合の結果にて、 $\delta \rightarrow \infty$ にした結果と同じである。

Ⅲ－2－2. 衝突と考慮した場合

実験系においては、波の振幅は伝搬するにつれ減衰する。この節では、散逸系媒質における波と波との非線形相互作用を取り扱う。 $\omega_2 = \omega_1 + \omega_3$ の場合は、

$$n_2 = e^{-x/\delta} [n_2(0) \cos \{D(1 - e^{-x/\delta})\} - (\omega_2/\omega_3)^{1/2} n_3(0) \sin \{D(1 - e^{-x/\delta})\}] , \quad (5)$$

$$n_3 = e^{-x/\delta} [n_3(0) \cos \{D(1 - e^{-x/\delta})\} + (\omega_3/\omega_2)^{1/2} n_2(0) \sin \{D(1 - e^{-x/\delta})\}] , \quad (6)$$

ここに、

$$D \equiv 2 n_1(0) (\omega_2 \omega_3)^{1/2} / N_0 \nu_{in} \quad (7)$$

である。

$$n_2(0) > n_3(0) , \quad D(1 - e^{-x/\delta}) \ll 1 \quad (8)$$

がみたされる場合は、

$$n_2 = n_2(0) e^{-x/\delta}, \quad (9)$$

$$n_3 = 2 \omega_3 n_1(0) n_2(0) e^{-x/\delta} (1 - e^{-x/\delta}) / \nu_{in} N_0 + n_3(0) e^{-x/\delta}, \quad (10)$$

即ち、 ω_1, ω_2 成分の伝搬特性は、 ω_3 の存在に影響されず、 ω_1, ω_2 成分は ω_3 の生成に大きく帰与している。 ω_3 成分は、 $e^{-x/\delta} (1 - e^{-x/\delta})$ の形をとっている。

周波数条件が、 $\omega_1 = \omega_2 + \omega_3$ で与えられた場合は、

$$n_2 = e^{-x/\delta} [n_2(0) \cosh \{D(1 - e^{-x/\delta})\} - (\omega_2/\omega_3)^{1/2} n_3(0) \sinh \{D(1 - e^{-x/\delta})\}] , \quad (11)$$

$$n_3 = e^{-x/\delta} [n_3(0) \cosh \{D(1 - e^{-x/\delta})\} - (\omega_3/\omega_2)^{1/2} n_2(0) \sinh \{D(1 - e^{-x/\delta})\}] . \quad (12)$$

(8) の条件がみたされる場合、

$$n_2 = n_2(0) e^{-x/\delta} , \quad (13)$$

$$n_3 = -2\omega_3 n_1(0) n_2(0) e^{-x/\delta} (1 - e^{-x/\delta}) / \nu_{in} N_0 + n_3(0) e^{-x/\delta} , \quad (14)$$

のようになる。

Ⅲ-2-3. 高調波の伝搬特性

前節と同様に取り扱われ、高調波の振幅は、 $\omega_2 n_1(0)^2 e^{-x/\delta} (1 - e^{-x/\delta})$ に比例する。ここに、高調波は 2 成分で、基本波は "1" 成分のサフィックスを用いてある。

Ⅲ-2-4. 共鳴条件をみたさない場合

ω_1 と ω_2 とを外部より印加して、その混成波としての和周波数 $\omega_2 = \omega_1 + \omega_3$ を考える。イオン波の分散式は、イオン音波の領域よりイオン・プラズマ振動領域に周波数を上げていくと、位相速度が遅くなる。3 成分のうちの 1 成分でもこの領域に入れば、共鳴条件をみたさなくなる。この場合は、

$$n_2 = \omega_2 n_1(0) n_3(0) e^{-x/\delta} \cdot \{1 - e^{(-1/\delta + i\Delta K)x} / C_p N_0 (1/\delta + i\Delta K)\} . \quad (15)$$

ΔK が mismatching' の効果として入っている。

第 IV 章 討 論

Ⅳ-1. イオン波の伝搬特性について

波の減衰は、イオン・中性分子間の衝突によるものであること、Ballistic mode 成分が実験にはあまり入っていないことを確めた。

Ⅳ-2. 混成波と同じ周波数の信号が混在する時

外部より混成波と同じ周波数の信号を加えることにより検討し、実験においては、ソースから出来る非線形量は、分布型混成波として出来る量に比して十分小さいことを示してある。

Ⅳ-3. 実験と理論との比較

実験のすべてにおいて、 $n_1(0)/N_0 \lesssim 1/20$ が成立つので、理論において、(8) の条件が成立つ。定性的な実験結果は、理論からの $n_1(0) n_2(0) e^{-x/\delta} (1 - e^{-x/\delta})$ に合うことを示している。高調波の場合も、同様に定性的に理論と実験が合うことを確めた。共鳴条件が成立たなくなる場合、

積み重ね効果が弱くなることを，実験結果が定性的に合うことを確めた。

第 V 章 結 論

プラズマ中の分布型混成波生成の現象をイオン波を用いて，実験的，且つ，理論的に確められた。

謝 辞

本論文作成において，終始有益な討論及び激励して下さった恩師八田吉典教授に深く感謝の意を表します。

審 査 結 果 の 要 旨

プラズマ中の波動はプラズマ電子工学の立場から又は核融合制御の基礎物理としての観点から広く研究されているが、それらの内、最近特に注目されている研究分野に非線形現象がある。著者はその中の1つである伝搬する2つのイオン音波によっておこされる非線形混成波生成現象をとり上げ、その実験的ならびに理論的研究を行なった。本論文はそれらの研究成果をまとめたもので、全文5章より成る。

第1章は序論で非線形混成波生成の定義について説明するとともに、その研究を行なうことの意義についてのべている。

第2章では著者の行なった実験的研究についてのべている。一般に非線形媒質に周波数 f_1, f_2 の波動を伝搬させた場合、波動が伝搬する空間の各点で $mf_1 \pm nf_2$ (m, n は正整数)なる周波数の摂動が発生する。この摂動が各点で波動を励起し、その積み重ねとして $mf_1 \pm nf_2$ の波動が伝搬し得る。これが非線形混成波生成である。著者はプラズマ中のイオン音波の伝搬の場合について、この現象の実験を行ない、位相速度が一定である範囲では場所的に分布して発生した混成波の位相がそううために積み重ねが有効に行なわれて、衝突減衰があるにもかかわらず混成波の場所的増大がおこり得ることを $m=n=1$ 、および $m=2, n=0$ の場合について実測するとともに、周波数がイオンプラズマ周波数に近付いて位相速度の低下がおこりはじめると、積み重ね効果が弱まって混成波の振幅が小さくなることを示した。このことは、プラズマ中のイオン音波の研究に関連して意義深い知見であって、本論文の中心をなすものである。

第3章では理論的研究についてのべている。著者は、 $mf_1 \pm nf_2$ 成分の内、イオン音波の位相速度が一定である範囲に入る成分が1つ(例えば $f_1 - f_2$)である場合をとりあげ、 f_1, f_2 および $(f_1 - f_2)$ なる3つの波の間の非線形結合として問題を処理し、ついで衝突減衰を考慮して前章の実験結果を説明するための非線形混成波生成の理論を導いている。

第4章では実験と理論とを比較して討論を行なっている。両者の一致はよく、特に混成波の振動数がイオンプラズマ振動数に近付いた場合の混成波の振幅の減衰がほぼ説明されたことおよびイオン音波励起用グリッドの周囲のイオンシースで発生する非線形効果を実験的に識別し得たことなどは興味ある知見である。

第5章は結論である。

以上要するに本論文はプラズマ中に2つのイオン音波が伝搬する場合の非線形混成波生成について、理論と実験の両面から研究して得られた多くの知見をまとめたものであって、プラズマ物理工学上ならびに基礎電子工学上、寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。